

震度継続時間予測モデルの 実地震に対する適用と検証

能島 暢呂¹・久世 益充²

¹正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）
E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学准教授 流域圏科学研究所センター（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）
E-mail: kuse@gifu-u.ac.jp

筆者は既往研究において、震度情報を与件とする震度継続時間の条件付予測式を提示した。さらに、震度の距離減衰式と継続時間の条件付予測式を統合して、予測震度のばらつきを考慮した震度継続時間の期待値および標準偏差を確率論的に定式化したが、実地震への適用と精度検証を課題としていた。本研究は震度・継続時間の一貫した経験的予測スキームを2014年長野県神城断層地震に適用し、予測精度に関する検証を行ったものである。観測震度に基づく継続時間予測値は実測値と相関が高いことと、距離減衰式による予測震度に基づく継続時間予測値はばらつきが大きくなるが残差に偏りがないことを示した。また予測震度を介さない震度継続時間予測モデルを構築して予測結果を比較し、提案スキームの有効性を示した。

Key Words : uniform duration, JMA seismic intensity, threshold, Nagano-ken Hokubu Earthquake, 2014, validation

1. 本研究の背景と目的

気象庁震度¹⁾は、わが国の地震防災分野において最もよく用いられる地震動強度指標の一つであり、距離減衰式^{2), 3)}による簡便な予測手法が提案されている。一方、2011年東北地方太平洋沖地震では、震度4以上に相当する継続時間が約180秒に達した例が気象庁⁴⁾により報告されるなど、震度の継続時間への関心も高まっている。継続時間は、振幅特性・周期特性と並んで地震動を特徴づける要因であり、その重要性に鑑みて多くの研究が行われている^{5), 6)}。しかしながら、気象庁震度を対象とした継続時間の予測式に関する研究事例はこれまで見られなかつた。

こうした背景のもとで筆者の一人は「震度継続時間 D_{UAI} 」(UAI: Uniform/Absolute/Intensity) を定義して、その予測スキームを構築した^{7), 8)}。まず震度継続時間 D_{UAI} の計測手順は次の通りである⁷⁾。

- 1) 水平2成分と上下動成分の3成分の加速度記録に気象庁震度を求める手続き¹⁾を適用し、震度算出用のフィルターで処理した3成分合成波形を求める。
- 2) 瞬間計測震度⁹⁾の算出の改良手法として、時間区間 $t_w=0.5\text{s}$ で継続時間 $\tau_0=0.1\text{s}$ を満たすレベル（移動80パーセンタイル値）の震度の時間関数を求める。

3) "Absolute threshold" (地震動強度の閾値を絶対値で定義¹⁰⁾) として8種の閾値震度 ($I^*=0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0$) を定める。

4) "Uniform duration" (地震動が所定の閾値を超過した正味の時間¹⁰⁾) の定義に従って継続時間を計測する。震度継続時間 D_{UAI} を予測することを目的として、震度 I (観測値 I_{obs} もしくは予測値 I_{pre}) が確定的に与えられるごとに前提に、震度差 $\Delta I = I - I^*$ を説明変数とした D_{UAI} の条件付予測式を構築した⁵⁾。さらに、想定地震の震度予測に合わせて継続時間予測を行うことを可能とするため、距離減衰式に基づく予測震度のばらつきを考慮して、震度継続時間を確率論的に定式化し、両者の一貫した予測体系を提案した⁸⁾。

これまでに仮想的な地震（立川断層地震）を対象とした適用事例は示したものので、実地震への適用とモデル検証を課題としていた。また通常の重回帰分析により得られる予測モデルとの比較・検証も課題として残されていた。そこで本研究では、2014年長野県北部の地震¹¹⁾ ($M_w=6.2$) (これ以降、長野県神城断層地震) を対象としてこれらの課題を扱うものである。

以下、2.では、震度情報を与件とする震度継続時間の予測スキームの概要を示す。3.では、長野県神城断層地震の震源断層の設定について示し、震度予測と震度継続

時間予測を一貫して行った適用例を示す。4.では、K-NET記録を用いて、震度および震度継続時間の予測の精度検証を行う。5.では、通常の重回帰分析による予測モデルを構築し、それを用いた予測結果との比較を通じて予測精度の検証を行う。6.では本研究の成果をまとめめる。

2. 震度継続時間の予測スキームの概要

(1) 予測スキームの枠組みと本研究の位置づけ

図-1に既往研究^{7), 8)}で提案した震度継続時間の予測スキームの枠組みと、本研究による検証の位置付けを示す。既往研究^{7), 8)}では、計測震度の予測式の説明変数群に加えて、対象とする震度閾値 I^* と観測震度 I_{obs} との震度差 $\Delta I = I_{\text{obs}} - I^*$ を説明変数として重回帰分析を適用し、震度継続時間の条件付予測式を構築した。予測時には、予測震度 I_{pre} との震度差 $\Delta I = I_{\text{pre}} - I^*$ を用いる。予測震度を確定的に扱う場合は、この条件付予測式を直接的に適用すればよく、これについては文献⁷⁾を要約して次節(2)で説明する。一方、予測震度は本質的に不確定性を伴うので、条件付予測式のばらつきに加えて、予測震度のばらつきを考慮する必要がある。この場合については文献⁸⁾を要約して次々節(3)で説明する。

本研究では、図-1の破線内にあるように実地震の震源特性と評価地点におけるサイト特性を踏まえて、震度継続時間の予測式を適用し、実測値と比較して精度の検証を行う。その適用結果については3.および4.に示す。また比較のため、予測震度を説明変数から除外して通常の重回帰分析を適用して震度継続時間の予測モデルを構築し、予測結果の比較検討を行う。これについては5.に示す。

(2) 予測震度（または観測震度） I が確定的に与えられる場合⁷⁾

震度閾値 I^* を上回る震度継続時間 D_{UAL} [s]は、次式で予測される⁷⁾（本研究では対数の底はすべて10として底の表示を省略する）。

$$\log D_{\text{UAL}} = i_1 \log(\Delta I) + i_2 \{\log(\Delta I)\}^2 + m \cdot M_w + r \cdot \log R + v \cdot \log AVS_{30} + z \cdot \log Z_{1.4} + \sum_k F_k \cdot f_k + c \quad (1)$$

ここに $\Delta I = I - I^*$ ：予測震度（または観測震度） I と震度閾値 I^* との震度差、 M_w ：モーメントマグニチュード、 R [km]：断層最短距離、 AVS_{30} [m/s]：着目地点における平均S波速度、 $Z_{1.4}$ [m]：S波速度 $V_s=1400$ m/s上面深さ、 F_k ：地震タイプを表す二値ダミー変数（ F_1 ：内陸地殻内、 F_2 ：プレート境界、 F_3 ：プレート内）、 c ：定数項であり、 $i_1, i_2, m, r, v, z, f_k, f_j$ はモデル係数である（ $f_j=0$ は固定）。式(1)の導出過程の詳細やモデル係数等については文献⁷⁾を参照されたい。本研究では式(1)の $\log D_{\text{UAL}}$ を期待値 μ_D とする。予測式の残差標準偏差 σ_D は震度閾値 I^* ごとに与えられており、 $\sigma_D=0.16\sim0.20$ 程度の値である。

図-2は継続時間の期待値 $D[\mu_D]=10^{D_D}$ および $D[\mu_D \pm \sigma_D]=10^{(D_D \pm \sigma_D)}$ を図示した例である。後出の長野県神城断層にあわせて $M_w=6.2$ の内陸地殻内地震について、 $R=20$ km、 $AVS_{30}=350$ m/s、 $Z_{1.4}=250$ mの条件で、 $I^*=1.5, 3.5, 5.5$ に対する結果を示している。条件付予測式においては、継続時間は $I > I^*$ でのみ値を持ち、予測値のばらつきは比較的小さい。

(3) 予測震度 I の不確定性を考慮する場合⁸⁾

予測震度の不確定性を考慮するため、予測震度 I を期待値 μ_I 、標準偏差 σ_I の正規分布 $N(\mu_I, \sigma_I)$ に従う確率変数と考え、その関数としての $\log D_{\text{UAL}}$ の期待値 $E[\log D_{\text{UAL}}]$ と

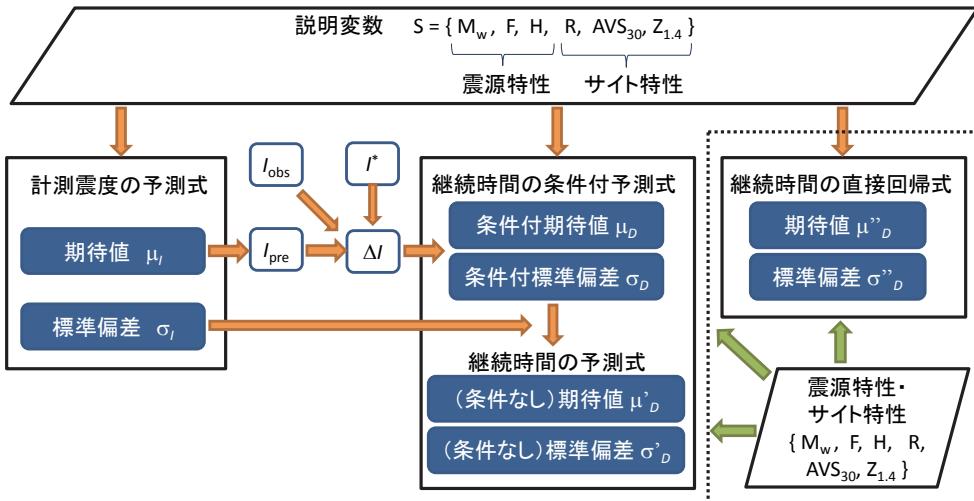


図-1 震度と震度継続時間の一貫した予測スキームの枠組みと本研究による検証の位置づけ（文献⁸⁾に加筆）

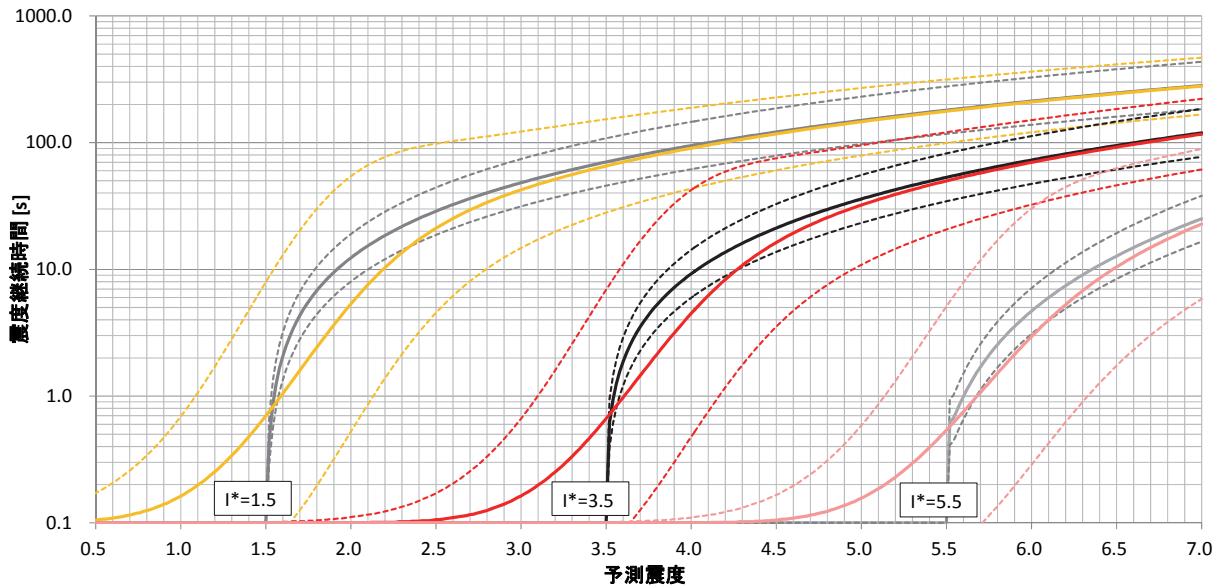


図-2 震度継続時間 D_{UAI} の条件付予測式(1)および予測震度のばらつきを考慮した予測式(4)(5)の期待値と不確定性
(左から $I^*=1.5, 3.5, 5.5$ の3種類, $M_w=6.2, R=20\text{km}, \text{AVS}_{30}=350\text{m/s}, Z_{14}=250\text{m}, F_1=1$)
灰・黒・薄灰色の実線・破線は $D[\mu_D \pm \sigma_D]$, 黄・赤・桃色の実線と破線は $D[\mu'_D \pm \sigma'_D]$

分散 $\text{Var}[\log D_{\text{UAI}}]$ を求める⁸⁾.

いま式(1)を $g(I)=\log D_{\text{UAI}}$ で表すと, $g(I)$ の定義域は $I > I^*$ である一方, $N(\mu_I, \sigma_I)$ は理論的には $(-\infty, \infty)$ の拡がりを持つ. そこで, 予測震度 I が震度閾値 I^* を上回るか($I > I^*$)否か($I \leq I^*$)で場合分けした上で, 次式で評価する.

$$\begin{aligned} \text{E}[\log D_{\text{UAI}}] &= P(I \leq I^*) \cdot \text{E}[\log D_{\text{UAI}} | I \leq I^*] \\ &\quad + P(I > I^*) \cdot \text{E}[\log D_{\text{UAI}} | I > I^*] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\log D_{\text{UAI}}] &= \\ &P(I \leq I^*) \cdot \left\{ \text{E}[\log D_{\text{UAI}}] - \text{E}[\log D_{\text{UAI}} | I \leq I^*] \right\}^2 \\ &+ P(I \leq I^*) \cdot \text{Var}[\log D_{\text{UAI}} | I \leq I^*] \\ &+ P(I > I^*) \cdot \left\{ \text{E}[\log D_{\text{UAI}}] - \text{E}[\log D_{\text{UAI}} | I > I^*] \right\}^2 \\ &+ P(I > I^*) \cdot \text{Var}[\log D_{\text{UAI}} | I > I^*] \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)は各条件での期待値を加重平均したものである. また式(3)は級間分散と級内分散との和を各条件で加重平均したものである. 震度 I の不確定性を考慮した場合に関数 $g(I)$ が従う確率分布の期待値と分散を, テーラー展開のそれぞれ二次近似と一次近似で表すと, 最終的に次式が得られる.

$$\begin{aligned} \text{E}[\log D_{\text{UAI}}] &= (1 - P^*) \cdot \log d_{\min} \\ &+ P^* \cdot \left\{ g(\mu_{I(TN)}) + \frac{1}{2} \sigma_{I(TN)}^2 \cdot \left. \frac{d^2 g(I)}{dI^2} \right|_{I=\mu_{I(TN)}} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[\log D_{\text{UAI}}] &= (1 - P^*) \cdot \left\{ \text{E}[\log D_{\text{UAI}}] - \log d_{\min} \right\}^2 \\ &+ P^* \cdot \left[\text{E}[\log D_{\text{UAI}}] - \right. \\ &\quad \left. + P^* \cdot \left\{ g(\mu_{I(TN)}) + \frac{1}{2} \sigma_{I(TN)}^2 \cdot \left. \frac{d^2 g(I)}{dI^2} \right|_{I=\mu_{I(TN)}} \right\} \right]^2 \\ &+ P^* \cdot \left[\sigma_D^2 + \sigma_{I(TN)}^2 \cdot \left\{ \left. \frac{dg(I)}{dI} \right|_{I=\mu_{I(TN)}} \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ここに,

$\phi(\cdot)$: 標準正規分布の確率密度関数,

$\Phi(\cdot)$: 標準正規分布の累積分布関数,

$s = (I - \mu_I) / \sigma_I, s^* = (I^* - \mu_I) / \sigma_I$ として,

$P^* = P(I > I^*) = 1 - \Phi(s^*)$: $I > I^*$ となる確率,

d_{\min} : 継続時間0と見なせる時間長($d_{\min} = \tau_0 = 0.1\text{s}$ に設定),

$\mu_{I(TN)} = \mu_I + \frac{\sigma_I}{R(s^*)}$: 定義域 $[I^*, \infty)$ の切断正規分布

$TN(\mu_I, \sigma_I; I^*)$ の期待値

$\sigma_{I(TN)}^2 = \sigma_I^2 \left[1 + \frac{s^*}{R(s^*)} - \left\{ \frac{1}{R(s^*)} \right\}^2 \right]$: 同じく分散,

$R(s) = \{1 - \Phi(s)\} / \phi(s)$: 危険度関数の逆数,

σ_D : 式(1)の標準偏差で, 継続時間予測式のばらつき.

また式(4)(5)に現れる一階微分と二階微分は, 式(1)より次式で表され, $I = \mu_I$ での評価値をとる.

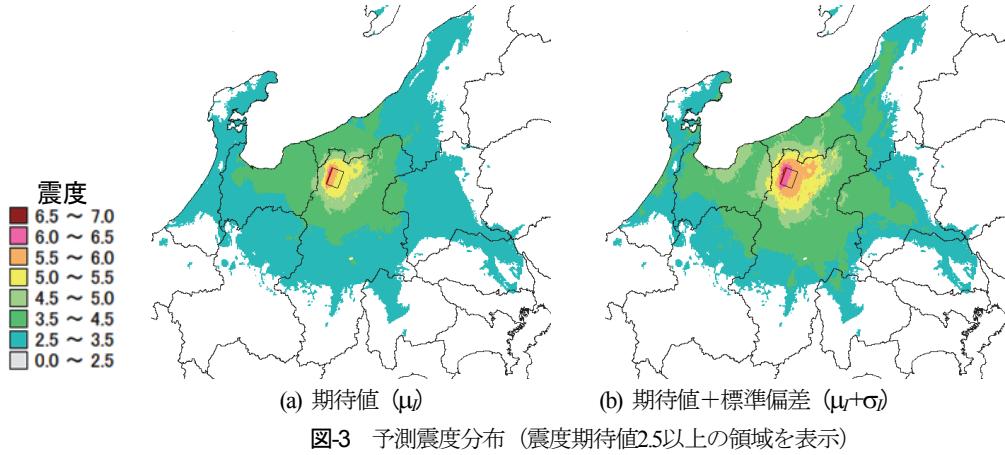


図-3 予測震度分布（震度期待値2.5以上の領域を表示）

$$\frac{dg(I)}{dI} \Big|_{I=\mu_I} = \frac{i_1 + 2i_2 \log(\Delta I)}{\Delta I} \Big|_{I=\mu_I} \quad (6)$$

$$= \frac{i_1 + 2i_2 \log(\mu_I - I^*)}{\mu_I - I^*}$$

$$\frac{d^2g(I)}{dI^2} \Big|_{I=\mu_I} = \frac{-i_1 + 2i_2 \{1 - \log(\Delta I)\}}{(\Delta I)^2} \Big|_{I=\mu_I} \quad (7)$$

$$= \frac{-i_1 + 2i_2 \{1 - \log(\mu_I - I^*)\}}{(\mu_I - I^*)^2}$$

これらの詳しい誘導過程については文献⁸⁾を参照されたい。式(4)の $E[\log D_{UAI}]$ を期待値 μ'_D とし、式(5)の分散 $Var[\log D_{UAI}]$ の平方根を標準偏差 σ'_D とする。以上により震度 I を与件としない継続時間の期待値 $D[\mu'_D]=10^{\mu'_D}$ および $D[\mu'_D \pm \sigma'_D]=10^{\mu'_D \pm \sigma'_D}$ を求める。

図-2には前出の条件で、予測震度の不確定性を考慮した $D[\mu'_D]$ および $D[\mu'_D \pm \sigma'_D]$ を図示している。継続時間は $I \leq I^*$ でも値を持ち、予測値のばらつきは条件付予測式よりも相対的に大きくなっている。

3. 2014年長野県神城断層地震への予測スキームの適用

(1) 地震の概要と震源モデルの設定

2014年11月22日22時08分に長野県北部を震源とする気象庁マグニチュード $M_f=6.7$ の地震が発生し、長野県戸隠や小谷村中小谷など4箇所の観測点で最大震度6弱を記録した¹¹⁾。この地震により長野県白馬村を中心に被害が発生した。糸魚川-静岡構造線活断層系¹²⁾（全長140～150km）の北部を構成する神城断層と松本盆地東縁断層のうち、神城断層の一部が活動したものと推定されたことから、長野県では2011年3月11日に発生した長野県北部の地震と区別するため、「長野県神城断層地震」とい

う呼称が用いられている。本研究ではこの地震を対象として、震度分布および震度継続時間の予測のケーススタディを通じて、予測スキームの検証を行う。

気象庁の発表¹³⁾によると、気象庁マグニチュード $M_f=6.7$ 、震源は、北緯36度41.5分、東経137度53.4分、深さ5kmであり、CMT解は、地震モーメント M_0 [dyne·cm]= 2.98×10^{25} 、モーメントマグニチュード $M_w=6.2$ 、セントロイドは北緯36度44.7分(36.745°)、東経137度54.2分(137.903°)、深さ10kmと求められている。強震動予測のレシピ¹⁴⁾を用いて M_0 から正方形断層面を仮定すると、断層面積 S [km^2]= $2.23 \times 10^{15} \times M_0^{2/3}$ より断層長さ・幅ともに14.62kmと求められ、ここでは15km四方の正方形断層面とした。震源位置、セントロイド位置、余震分布、地表地震断層、地殻変動分布などを参考に、断層基準点（南東端）を北緯36.640°、東経137.843°、走向N20°E、傾斜角45°、断層上端深さは0kmとした。

ちなみに「糸魚川-静岡構造線断層帯北部・中部」全体として、長期評価で予想されたマグニチュードは8程度 ($M_w=7.4$)、平均活動間隔 約1,000年、最新活動時期 約1,200年前で、地震後経過率 1.2、地震発生確率 30年以内 14%、50年以内 20%、100年以内 40%と推定されていた¹⁵⁾。

(2) 震度分布の予測

本研究では、Morikawa and Fujiwara³⁾による気象庁震度（計測震度相当）の距離減衰式（MF2013式）を用いて震度分布の予測を行った。浅部地盤增幅特性に関する30m平均S波速度AVS₃₀については「地震ハザードステーションJ-SHIS¹⁶⁾」で公開されている2分の1地域メッシュデータを用いた。深部地盤增幅特性に関する $V_s=1400\text{m/s}$ 層上面深度 Z_{14} についても同様に公開されている3次メッシュの深部地盤モデルデータ¹⁷⁾を用いた。標準偏差は $\sigma_I=0.48$ である。図-3に震度期待値(μ)および期待値+標準偏差($\mu+\sigma_I$)の分布を示す。図中の矩形は断層面の地表面投影である。震源近傍における震度期待値は震源断

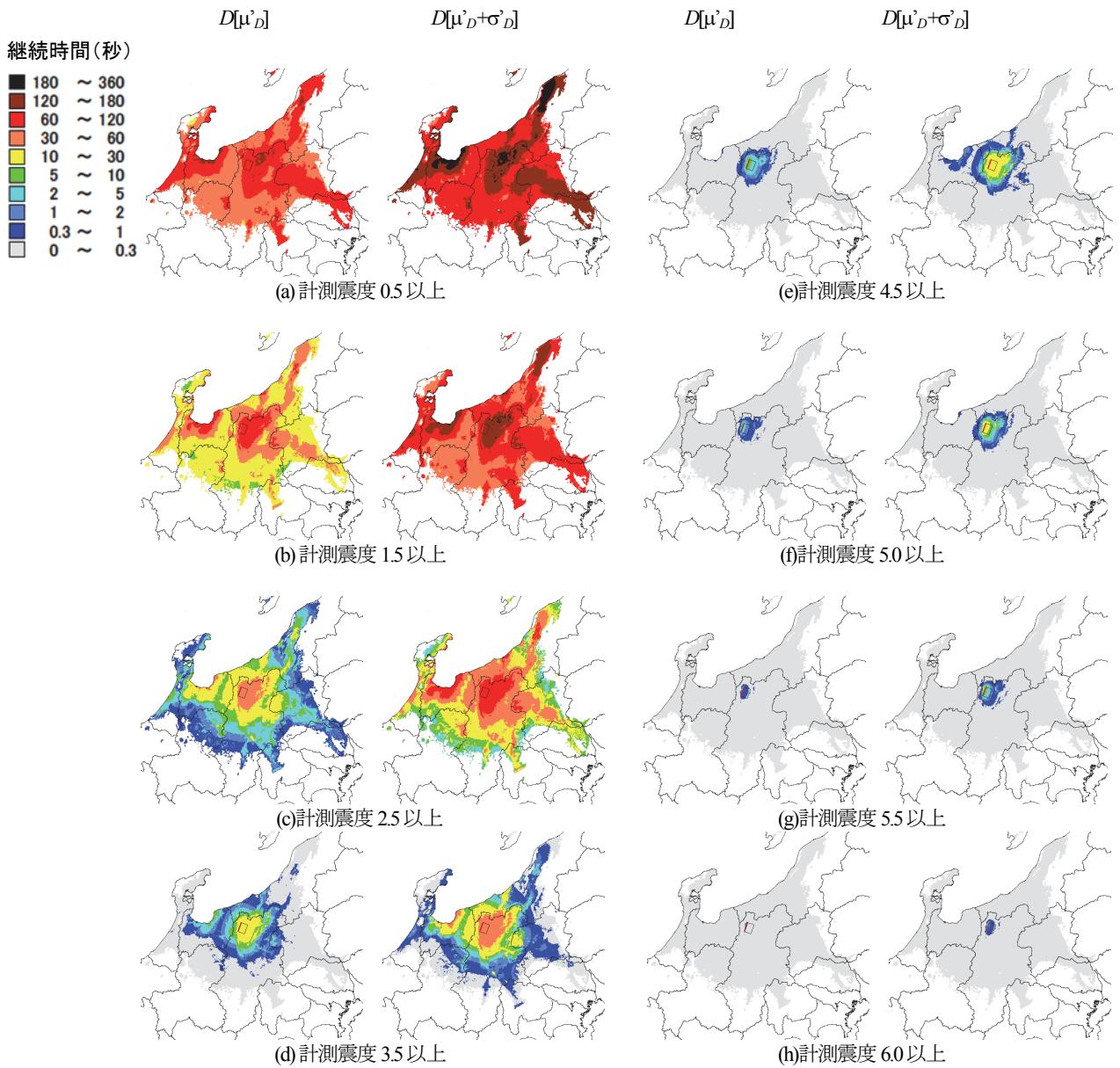


図4 長野県神城断層を対象とした震度継続時間の予測分布
(各閾値震度に対して、左列： $D[\mu'_D]$ 、右列： $D[\mu'_D + \sigma'_D]$ 、ともに震度期待値2.5以上の領域を表示)

層が浅いところで6強に達しているが、深いところでは震度5強程度である。震度5弱以上が長野県北部、震度4以上はさらに富山県、新潟県に及んでいる。標準偏差 $\sigma_I = 0.48$ を加えると、震度階級の強・弱のレベルがほぼ1ランク上がる形となっている。

(3) 震度継続時間の予測分布

予測震度のばらつきを考慮した震度継続時間の予測分布を図4に示す。震度閾値を $I^*=0.5 \sim 6.0$ としており、図-3(a)の震度期待値が2.5以上の領域のみを対象として結果を表示している。各震度閾値に対して2つの地図を並べているが、それぞれ左列は、式(4)による期待値 μ'_D を用いて $D[\mu'_D] = 10^{(\mu'D+\sigma'D)}$ により求めた震度継続時間であり、

右列は、式(4)(5)による期待値+標準偏差 $\mu'_D + \sigma'_D$ を用いて $D[\mu'_D + \sigma'_D] = 10^{(\mu'D+\sigma'D)}$ により求めた震度継続時間である。

まず左列の $D[\mu'_D]$ を見ると、低い震度閾値 I^* に対しては継続時間が長くなっているが、有感と解釈できる計測震度0.5以上では1分以上の継続時間が広範囲に及んでいる。しかし震度閾値が高くなるにつれて予測震度が高い地域で限定的に継続時間が予測されている。予測震度が震度閾値 I^* をやや下回る場合でも短い継続時間が予測されているのは、予測震度のばらつきを考慮しているためである。

右列の $D[\mu'_D + \sigma'_D]$ は、継続時間の条件付予測式のばらつき σ_D と震度予測式のばらつき σ_I の影響を合わせたトータルのばらつき σ'_D を見込んでいるため、継続時間は全

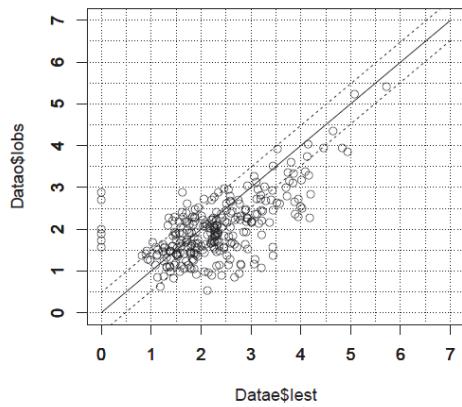


図-5 K-NET観測地点における予測震度（横軸）と観測震度（縦軸）との比較

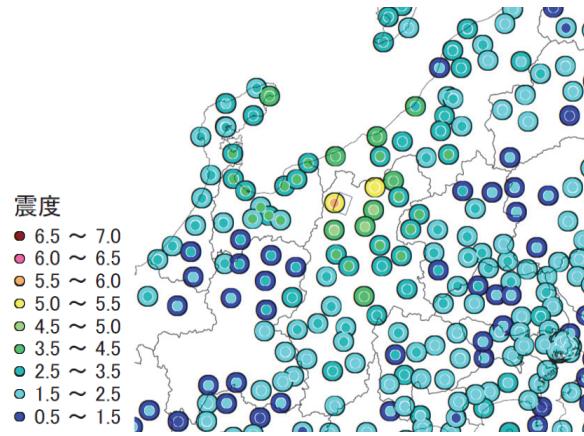


図-6 K-NET観測地点における予測震度（小円）と観測震度（大円）

一般的に長時間化している。期待値レベルの $D[\mu'_D]$ による評価では、震源近傍における震度5強の継続時間は数秒程度、震度6弱では1秒程度となっているが、 $D[\mu'_D + \sigma'_D]$ による評価では、それぞれ10秒以上、数秒程度と予測されている。地震防災上は特に高震度レベルの継続時間が重要であり、過小評価とならないよう注意が必要である。

4. K-NET記録による予測スキームの検証

K-NET観測記録を用いて震度予測・継続時間予測スキームの検証を行う。まず図-5にK-NET観測地点における予測震度 μ'_D と観測震度との比較を示す。ただしK-NET観測地点の30m平均S波速度AVS₃₀に関しては、上記とは異なり、ボーリングデータから求められた値を用いている。観測震度が1.0～3.5の部分で予測震度2.0～4.5とした過大評価が見受けられる。図-6はこれらの分布について、予測震度を小円、観測震度を大円で示したものである。主として震源断層の西側にあたる富山県・岐阜県・石川県で過大評価がやや目立っている。観測震度で3.5以上の領域では予測震度と良い整合を示している。

図-7は、K-NET観測震度に基づく継続時間の予測値（横軸）と実測値（縦軸）とを常用対数表示で比較したものであり、1:1線と $\pm \sigma_D$ を表示している。震度予測に伴う不確定性がないため、両者の整合はかなり良く、ばらつきは小さい。これに対して図-8は、K-NET観測点において距離減衰式による予測震度に基づいて推定された継続時間の予測値（横軸）と実測値（縦軸）とを比較したものである。ここでも常用対数表示で $\pm \sigma_D$ を示しているが、標準偏差は観測点ごとに異なる値をとるために、条件を $R=20\text{km}$ 、 $\text{AVS}_{30}=350\text{m/s}$ 、 $Z_{14}=250\text{m}$ に固定して求めた σ'_D を用いている。震度0.5以上、1.5以上、2.5以上においては、震度予測の過大評価の影響を受ける形で、部分的に継続時間も過大評価となっているが、概ね想定され

たばらつきの範囲である。震度3.5以上についてはデータが少ないものの、 $\pm \sigma'_D$ の範囲に収まっており偏りは見られない。

図-7と図-8との差異は、震度の距離減衰式の推定精度に由来するものであり、予測震度が実測震度から大きく外れた場合には、必然的に震度継続時間予測値も大きく外れることとなる。逆にいえば、予測震度の精度向上によって、この差異が縮小されるといえる。以上より、データが限定的であるため部分的ではあるが、提案手法の妥当性が示された。

5. 震度を条件としない直接回帰による震度継続時間予測モデル

(1) 用いたデータと予測式

本研究では比較のため、震度を条件としない震度継続時間予測モデルを構築する。用いるデータは前報⁷⁾と同じく、1996年4月～2013年12月に震度6弱以上を観測した地震をはじめとする35地震であり、(独)防災科学技術研究所のK-NET²⁰⁾による加速度記録（計10,411記録）と、気象庁²¹⁾による震度6弱以上の加速度記録（全35地震のうち20地震、計239記録）を加えて、計10,650記録×3成分を使用した。

ここで、閾値震度ごとの重回帰分析においては、それぞれ I^* に達した（すなわち計測震度が $I > I^*$ を満たす）データのみが対象となる。こうした”truncated data”を対象とする場合、距離勾配が実際よりも緩勾配に評価され、その結果として、短時間の継続時間が過大評価されることが知られている。震度の条件付震度継続時間予測モデルでは、震度差 $\Delta I = I - I^*$ を説明変数に組み入れたため、この問題はおのずと回避できた。

本研究では、図-2より、継続時間が数秒に達すると考えられる震度差を概ね $\Delta I = I - I^* > 0.25$ として、これを満た

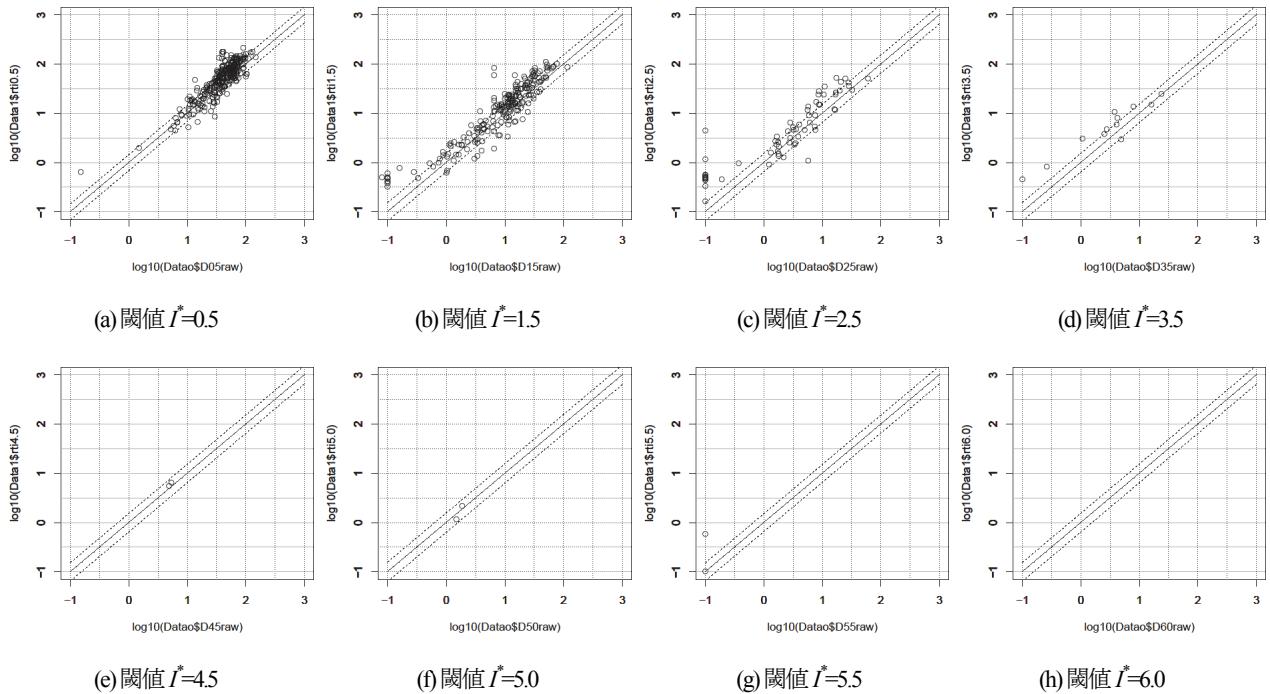


図-7 K-NET観測地点における観測震度に基づく継続時間の予測値（横軸）と実測値（縦軸）（常用対数表示）

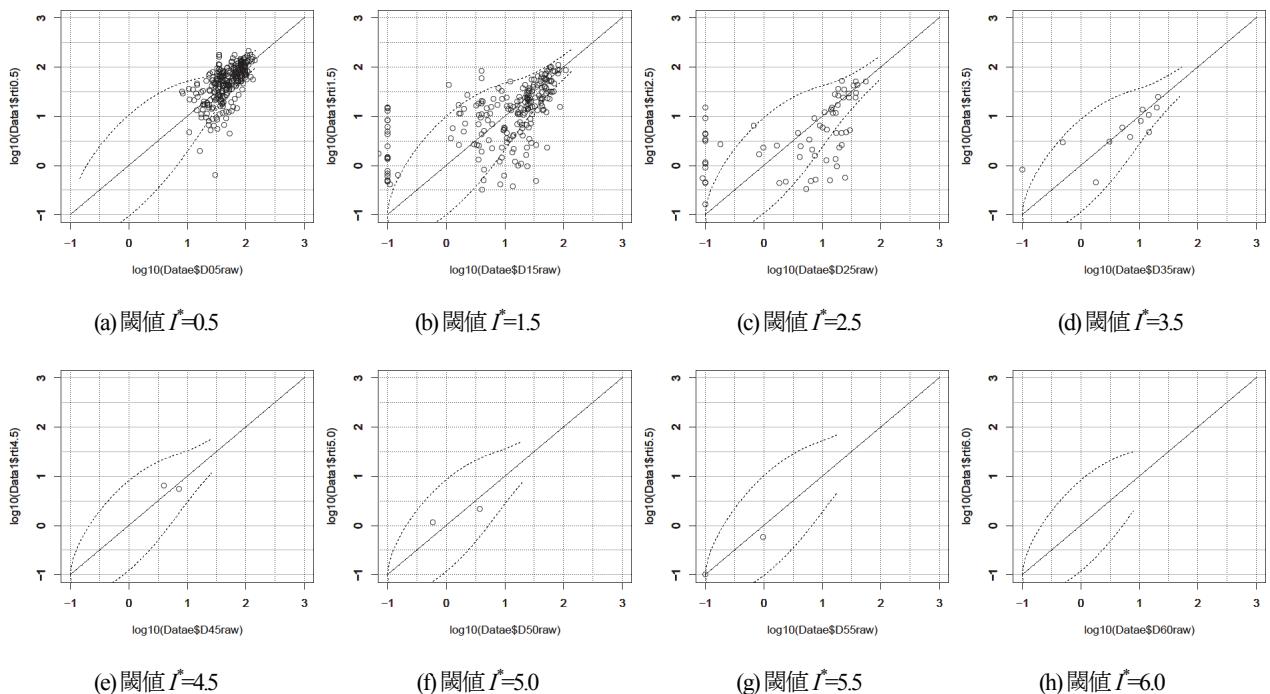


図-8 K-NET観測地点における予測震度（MF2013式）に基づく継続時間の予測値（横軸）と実測値（縦軸）（常用対数表示）

すデータに限定することで対処することとした。震度差を大きくすると、対象データ数が減少し、かつ、適用範囲が限定されるため、バランスを考えて0.25としたものである。予測式の関数形としては次式を用いた。

$$\log D_{\text{UAI}} = m \cdot M_w + r \cdot \log(R + s \cdot 10^{0.5M_w}) + v \cdot \log \text{AVS}_{30} + z \cdot \log Z_{1.4} + \sum_k F_k \cdot f_k + c \quad (8)$$

なお予測式(8)では、条件付予測式(1)と比較すると距離減衰項への依存が大きいと考えられるため、震源域で飽和効果を与える項を付加している。本研究では予測式(8)の $\log D_{\text{UAI}}$ を期待値 $\mu^* D$ とし、予測式の残差標準偏差を $\sigma^* D$ とする。以上により、継続時間の期待値 $D[\mu^* D] = 10^{\mu^* D}$ および $D[\mu^* D \pm \sigma^* D] = 10^{\mu^* D \pm \sigma^* D}$ を求める。

表-1 震度情報を用いない継続時間予測式(8)のモデル係数

I^*	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.0	5.5	6.0
m	0.6934	0.4810	0.3342	0.3835	0.4271	0.3792	0.3826	
r	-1.3255	-1.0156	-0.7900	-0.7339	-0.5231	-0.3448	-0.7203	-0.5763
s	0.0770	0.0101	0.0003	0.0000	0.0000	0.0013	0.0053	0.0000
v	-0.4360	-0.6148	-0.5251	-0.4145	-0.1038			0.4340
z	0.1746	0.1546	0.0969	0.0526		0.0580	0.0692	0.1055
f_2	0.0910	0.1002	0.2083	0.1323	-0.0659	-0.1706	0.1034	0.7205
f_3	0.1049	0.1675	0.2611	0.2544	0.2139	0.1394	0.3112	0.6381
c	1.2401	1.7038	1.5971	0.6068	-1.0399	-1.4796	-1.1730	-0.3245
σ_D	0.250	0.297	0.290	0.277	0.276	0.261	0.252	0.186
adj-R ²	0.623	0.610	0.648	0.690	0.617	0.441	0.266	0.333
adj-R	0.789	0.781	0.805	0.830	0.786	0.664	0.516	0.577

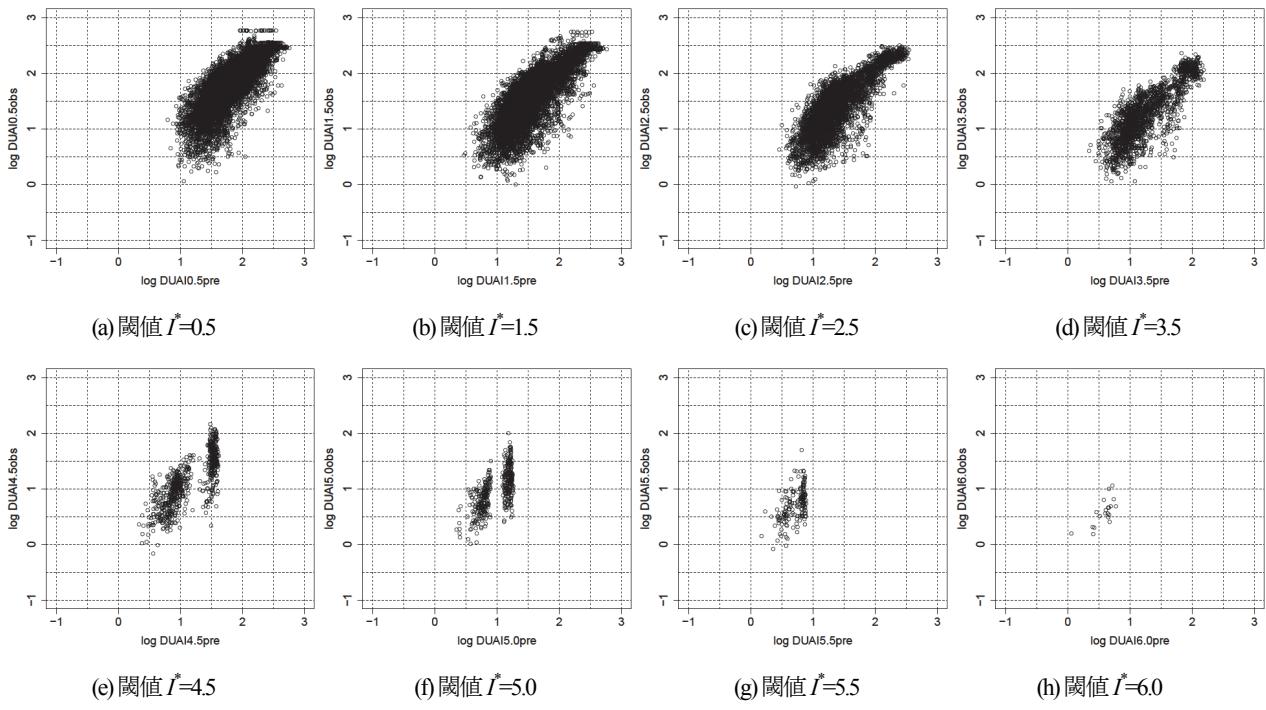


図-9 継続時間予測式(8)による予測値（横軸）と実測値（縦軸）（モデル化に用いた35地震の全記録対象、常用対数表示）

(2) 予測式の結果と長野県神城断層地震に対する適用結果

予測式(8)のモデル係数を求めるために重回帰分析を適用し、AIC最小化により得られたモデル係数を表-1に示す。また図-9は、モデル化に用いた35地震に関するデータについて、式(8)による継続時間の予測値（横軸）と実測値（縦軸）とを常用対数表示で図示したものである。両者はほぼ1:1線上に分布し、大きな偏りは見られないが、予測式(1)の結果（文献⁷⁾を参照）よりも全般的にはらつきは大きい。表-1によると、 $I^*=5.5$ と 6.0 については決定係数が0.4を下回り、特に当てはまりが悪い。それらを除外しても、標準偏差は $\sigma_D=0.25\sim 0.30$ 、自由度調整済決定係数は $R^2=0.61\sim 0.69$ 、自由度調整済相関係数は $R=0.78\sim 0.83$ の範囲である。震度で条件付けられた継続時間予測式(1)においては、全ての閾値震度に対して $\sigma_D=0.16\sim 0.20$ 、 $R^2=0.71\sim 0.92$ 、 $R=0.84\sim 0.96$ の範囲⁸⁾であるから、精度は全般的に条件付予測式(1)の方が良い

ことがわかる。

図-10は、予測式(8)で $M_w=6.2, 7.2, 8.2$ として、断層最短距離をパラメータとして図示したものである。全般的には閾値震度間で整合する結果が得られているものの、一部で曲線が交差して逆転している。複数の閾値震度で個別に予測式を行う場合には、大小関係を拘束することは困難と考えられる。一方、条件付予測式(1)では震度差 ΔI による拘束が効くため、こうした問題はほとんど見られなかった⁷⁾。

図-11は、長野県神城断層地震を対象として、継続時間予測式(8)による予測値（横軸）と実測値（縦軸）を比較したものであり、常用対数表示である。予測震度のばらつきを考慮した震度継続時間予測モデルによる図-8と比較すると、大局的には近い結果が得られているものの、短継続時間領域で過大評価の傾向を示し、レンジが狭いため、実測値のばらつきを適切に表現できていない。また高閾値震度での誤差は図-8と比較して大きい。これ

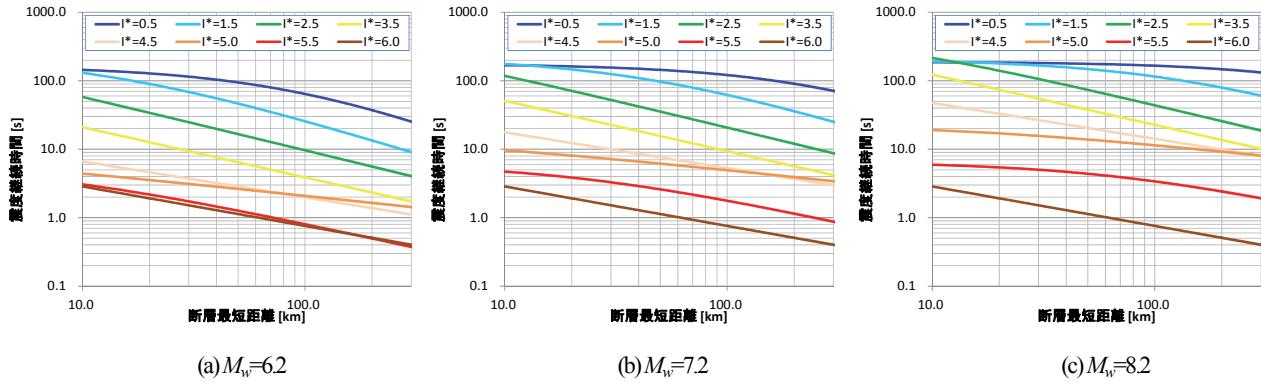


図-10 震度情報を用いない直接回帰による継続時間予測式(8)の図示 ($AVS_{30}=350\text{m/s}$, $Z_{14}=250\text{m}$, $F_1=1$)

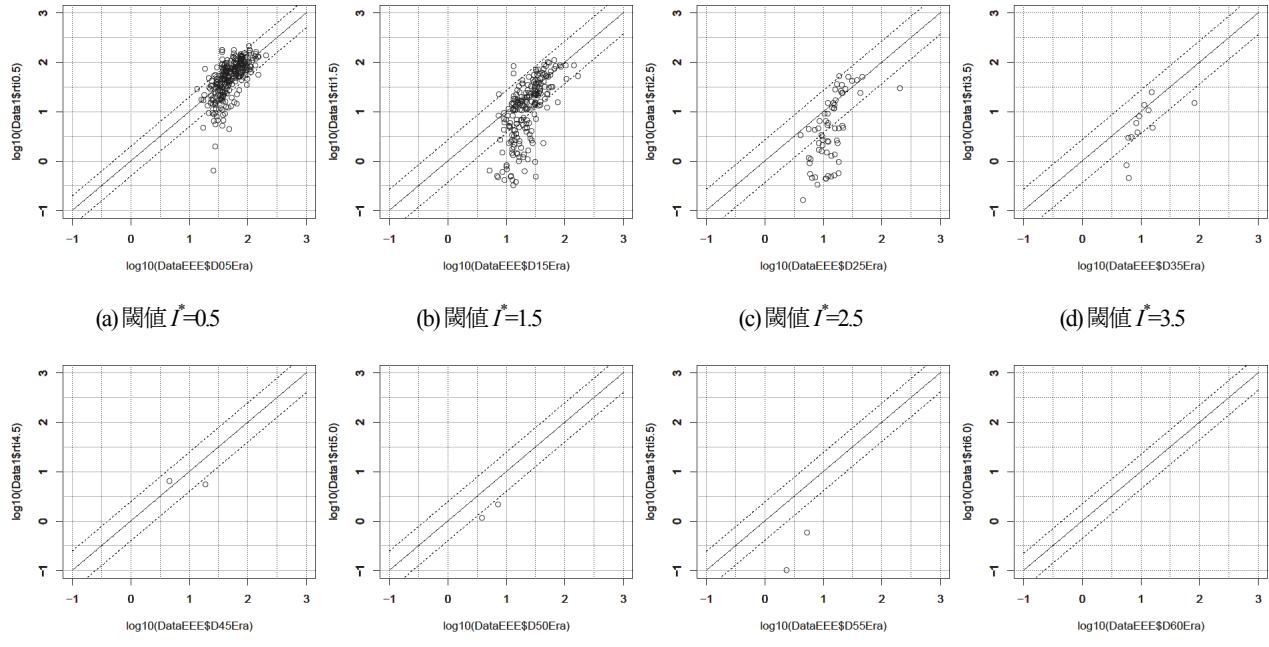


図-11 継続時間予測式(8)による予測値（横軸）と実測値（縦軸）（長野県神城断層地震）

らのことより提案スキームの優位性を見てとれる。

6. 結論

本研究は、計測震度0.5～6.0の8種類の閾値震度に対する震度継続時間の予測式^{7),8)}を、2014年長野県北部の地震（長野県神城断層地震, $M_w=6.2$ ）に適用し、提案スキームの予測精度に関して検証を行ったものである。得られた成果を以下に要約する。

- 1) 強震動予測のレシピに基づいて震源断層モデルを設定し、距離減衰式（MF2013式）を適用して予測震度マップを算出した。また予測震度を確定値とした場合と、ばらつきを考慮した場合の震度継続時間マップを算出した。いずれも期待値と期待値+標準偏差の2種類を示し、震度と震度継続時間の一貫した予測体系としての評価事例を示した。

2) K-NET観測地点における強震記録を用いて予測精度の検証を行った。加速度記録より算出した計測震度の実測値を確定値として予測式に代入して震度継続時間の予測値を求め、加速度記録から算出した震度継続時間の実測値と比較した。その結果、両者の間に非常に高い相関関係が見いだされ、予測式の妥当性が示された。

- 3) K-NET観測地点において、距離減衰式による予測震度に基づいて震度継続時間を予測し、実測値と比較した。予測震度の不確定性の影響を受けて大きくばらつくものの、予測値は実測値周りで大きな偏りが見られないことと、予測値の多くは理論的に導かれる標準偏差以内に収まっていることから、平均的には良好な結果が示された。
- 4) 比較のため、予測震度を介さずに直接的に重回帰分析を適用して震度継続時間予測モデルを構築した。

予測震度のばらつきを考慮した震度継続時間予測スキームに大局的には近い結果が得られるものの、短継続時間領域での過大評価や、高閾値震度での誤差の大きさなどに課題があることがわかった。結果として提案スキーム^{7,8)}の有効性が示された。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B)「海溝型地震による強震動予測法開発と継続時間に依存する構造物の損傷メカニズムの解明(2014~2016年度)」(代表：岐阜大学 杉戸真太教授)の補助を得て行ったものである。また本研究では(独)防災科学技術研究所K-NETおよび気象庁の強震記録を使用した。K-NET観測点におけるAVS₃₀については、東京工業大学大学院松岡昌志准教授にデータをご提供いただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 気象庁監修：震度を知る－基礎知識とその活用－、ぎょうせい、238p、1996.
- 2) 松崎伸一、久田嘉章、福島美光：断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発、日本建築学会構造系論文集、第604号、pp.201-208、2006.6.
- 3) Morikawa, N. and Fujiwara, H.: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Megathquake, *Journal of Disaster Research*, Vol.8, No.5 pp.878-888, 2013.
- 4) 気象庁：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震時に震度計で観測した各地の揺れの状況について、報道発表資料(平成23年3月25日)，2011.3.
- 5) Hancock, J. and Bommer, J. J.: A State-of-Knowledge Review of the Influence of Strong-Motion Duration on Structural Damage, *Earthquake Spectra*, Vol.22, No.3, pp.827-845, 2006.
- 6) 土木学会地震工学委員会 強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性検討小委員会：シンポジウム「強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価」、2012.5.
- 7) 能島暢呂：観測震度または予測震度を与件とする震度継続時間の条件付予測式、日本地震工学会論文集、第14巻、第5号、pp.50-67、2014.11.
- 8) 能島暢呂：震度と震度継続時間の一貫した経験的予測体系の提案、日本地震工学会論文集、第15巻、第2号、pp.59-76、2015.5.
- 9) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous Instrumental Seismic Intensity and Evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 10) Bommer, J. J. and Martinez-Pereira, A.: Strong-motion Parameters: Definition, Usefulness and Predictability, *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 2000, paper No.0206 (on CD-ROM).
- 11) 気象庁：平成26年11月22日22時08分頃の長野県北部の地震について(第2報)，
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1411/23b/201411230800.html>
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：糸魚川-静岡構造線活断層系の調査結果と評価について、平成8年9月11日，
<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/96augit/>
- 13) 気象庁：CMT解2014年11月22日22時08分長野県北部M6.7，
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20141122220817.html>
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図、付録3震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)，2009.7.
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furu3.pdf
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：主要活断層帶の長期評価の概要(算定基準日 平成26年(2014年)1月1日)，
<http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran.pdf>
- 16) (独)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 17) 藤原広行、河合伸一、青井真、森川信之、先名重樹、工藤暢章、大井昌弘、はお憲生、早川譲、遠山信彦、松山尚典、岩本鋼司、鈴木晴彦、劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、第337号、2009.

Application and Validation of the Consistent Scheme for Prediction of JMA Seismic Intensity and Its Duration

Nobuoto NOJIMA and Masumitsu KUSE

The author previously proposed prediction equations for uniform durations of JMA seismic intensity assuming that intensity is observed or predicted exogenously. Furthermore, by incorporating GMPE for intensity and its uncertainty, a consistent scheme for prediction of intensity and duration was proposed. However, application and validation of the proposed scheme to an actual earthquake has not been performed. In this study, the proposed scheme has been applied to the 2014 Nagano-ken Hokubu Earthquake ($M_w=6.2$). Durations estimated using observed intensity are highly correlated with observed durations. Those based on predicted intensity vary widely, however, dispersions are found to be unbiased around the observed durations. For comparison purpose, duration prediction equations obtained by direct regression are also derived and validated. As a whole, advantage of the suggested scheme has been validated.